УДК 621.791.2

МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА КАПЛИ В СВАРОЧНУЮ ВАННУ

О.Г. Брунов

Юргинский филиал Томского политехнического университета
E-mail: yftpu@mail.ru

Для рассмотрения условий отрыва и перетекания капли электродного металла в сварочную ванну, а также расчета действующих сил создана модель, наиболее полно отвечающая заданным условиям переноса капли, что позволяет определить протекание процесса в известных физических условиях.

Рассмотрен процесс перехода капли глицерина в жидкую ванну при импульсном движении капли и при непрерывном ее увеличении. Приведены кинограммы процессов и формулы расчета.

Отрыв капли электродного металла при сварке – это быстротекущий процесс, проходящий в сложных термодинамических условиях. Поэтому для рассмотрения условий отрыва и перетекания капли электродного металла в сварочную ванну, а также расчета действующих сил, необходимо создать модель, которая наиболее полно отвечает заданным условиям переноса капли и позволяет определить протекание процесса в известных физических условиях [1].

Для моделирования процесса, учитывая подобие, взят отрыв капли глицерина от стеклянной пипетки. Между глицерином и стеклом возникает адгезия и, следовательно, капля имеет непосредственную связь со смоченным глицерином торцем пипетки, поэтому на его основе можно моделировать отрыв капли электродного металла от сварочной проволоки, как при непрерывной подаче электродной проволоки, так и при импульсной подаче. Наиболее характерным переносом при сварке в CO_2, является перенос с короткими замыканиями, поэтому с помощью видеосъемки проведены исследования перехода капли с замыканием с жидкой ванной при:

1) непрерывном увеличении ее объема;
2) импульсном движении пипетки с остановкой, до их соприкосновения.

Подобие процесса соблюдается в том, что капля электродного металла образуется за счет постоянного плавления проволоки под действием тепла электрической дуги, а в модели – под действием давления на пипетку. При движении капли во время импульса давление дуги заменяется давлением атмосферного воздуха. Но в модели, в отличие от реального процесса сварки, все параметры, оказывающие влияние на перенос капли, известны, скорость движения пипетки во время импульса определяется по кадрам видеосъемки.

Имея два вида переноса, можно провести сравнительный анализ, дающий возможность определить преимущества одного способа перед другим.

Приведенные ниже кадры (рис. 1) дают возможность разделить процесс перехода капли на шесть этапов:

1. Увеличение размера капли до начала нарушения равнодействующих сил (*а, б, в, г*).
2. Начало сужения перемычки между каплей и пипеткой (*г, д*).
3. Касание каплей жидкой ванны (*е, ж*).
4. Втягивание капли в жидкую ванну (*з, и, к, л, м, н*).
5. Сужение жидкой перемычки между пипеткой и жидкой глицериновой ванной и разрыв жидкой перемычки (*о, п, р, с, т, у, ф, х, ц, ч, ш, щ, ы, э*).

На первом этапе происходит накопление массы капли и, следовательно, ее потенциальной энергии

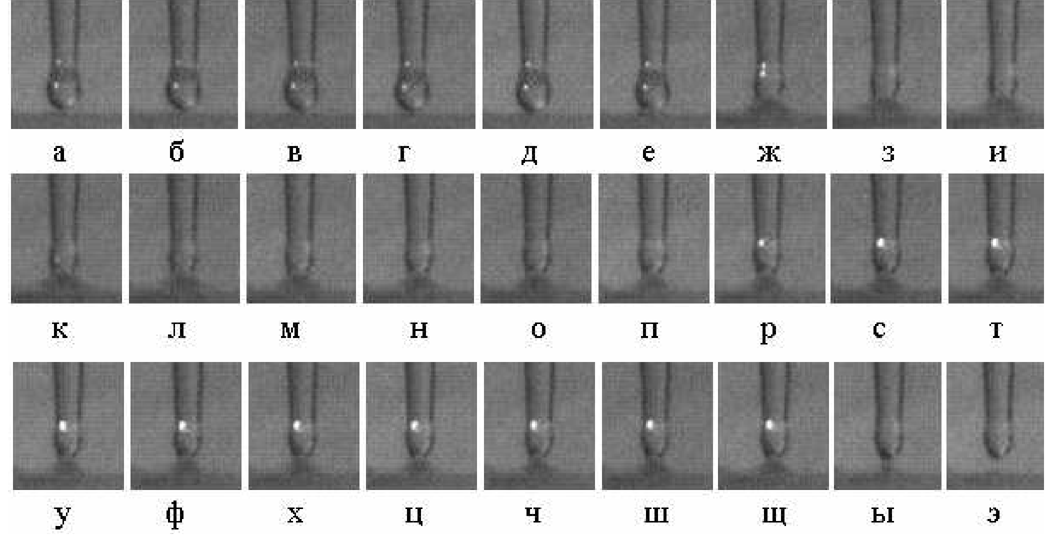


Рис. 1. *Видеокадры перехода капли глицерина в жидкую ванну при неподвижно закрепленной пипетке (400 кадр/с)*

$W_п$=mgh для нарушения равновесия сил удерживающих каплю. Когда радиус капли R достигает размера, который зависит от сил поверхностного натяжения и вязкости жидкости,

$$R = \frac{1}{2}\cdot\sqrt[3]{\frac{3\cdot r\cdot\sigma}{2\cdot\rho_{ж}\cdot\eta}},$$

где r – радиус пипетки; $\rho_ж$ – плотность жидкости; η – динамическая вязкость жидкости, дальнейшее увеличение массы капли приводит к увеличению ее длины без увеличения диаметра капли до начала утонения шейки, которое начинается при достижении равновесия

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\rho_{ж}-\rho_{в}) = \pi r^2\sigma,$$

где $\rho_в$ – плотность воздуха.

После этого начинается второй этап, удлинение капли без ее отрыва, при одновременном утонении шейки. Данный процесс протекает не мгновенно, а в зависимости от скорости поступления жидкости, поэтому необходимо определить скорость увеличения длины капли. Учитывая, что удлинение капли происходит под действием ускорения свободного падения, найдем скорость изменения длины из выражения

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \sqrt{\frac{\Delta V}{\Delta t}\cdot g\cdot(\rho_{ж}-\rho_{в})\cdot\frac{1}{\eta}},$$

где $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ – скорость увеличения объема; $\frac{1}{\eta}$ – текучесть жидкости.

Во время третьего этапа, дальнейшее увеличение длины капли приводит к ее касанию с жидкой ванной.

На четвертом этапе, после того, как капля коснулась жидкой ванны и произошло их слияние, начинается ее перетекание. Под действием сил гравитации и поверхностного натяжения формируется перемычка, которая приподнимает жидкую ванну в месте контакта благодаря капиллярным явлениям. Перетекание капли зависит от ее энергии, которая в свою очередь связана с силой поверхностного натяжения и капиллярной постоянной [2].

$$W_{кап} = F_{п.н.}\kappa + W_п = \sigma\pi(R_к - r_п)^2\sqrt{\frac{2\sigma}{g\rho_{ж}}} + mgh,$$

где κ – капиллярная постоянная; $R_к$ – радиус контакта капли с жидкой ванной; $r_п$ – радиус перемычки пипетки с каплей; h – расстояние между пипеткой и жидкой ванной.

На последнем этапе после втягивания капли происходит разрыв жидкой перемычки между пипеткой и жидкой ванной. Вязкость жидкости и продолжающаяся подача жидкости затягивают процесс разрыва.

Все эти этапы перехода капли соответствуют этапам перехода капли электродного металла в сварочную ванну с непрерывной подачей сварочной проволоки. Т.к. при сварке плавящимся электродом капля жидкого металла находится на торце сварочной проволоки, которая равномерно движется в сторону сварочной ванны, учитывая, что $\upsilon_{пл.}=\upsilon_{под}$ [3], можно сказать, что торец проволоки стоит на месте, а капля увеличивается в размерах за счет расплавления проволоки.

В предложенной модели отрыва капли, как и в реальных условиях сварки, капля имеет непосредственную связь с твердым носителем – стеклянной пипеткой, а масса и размеры капли равномерно увеличиваются за счет добавления жидкости до ее отрыва. Увеличение размера капли изменяет ее потенциальную энергию, которая, как и кинетическая, связана с массой. Следовательно, динамические силы, воздействующие на перенос металла, при непрерывной подаче проволоки, зависят от потенциальной энергии капли электродного металла.

При перенесении модели в реальные условия горения дуги необходимо учитывать, что в сварочной дуге отрыву капли в основном препятствуют плазменные потоки [4], состоящие из паров испаряющегося металла, сила которых связана со сварочным током отношением $F = A\frac{I^2}{S_a}$, где A – коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей; S_a – площадь анодного пятна.

В приводимых выше условиях плотность плазменных потоков моделируется как плотность окружающего воздуха.

Следующие видеокадры дают картину перехода капли глицерина в жидкую ванну при импульсном движении пипетки.

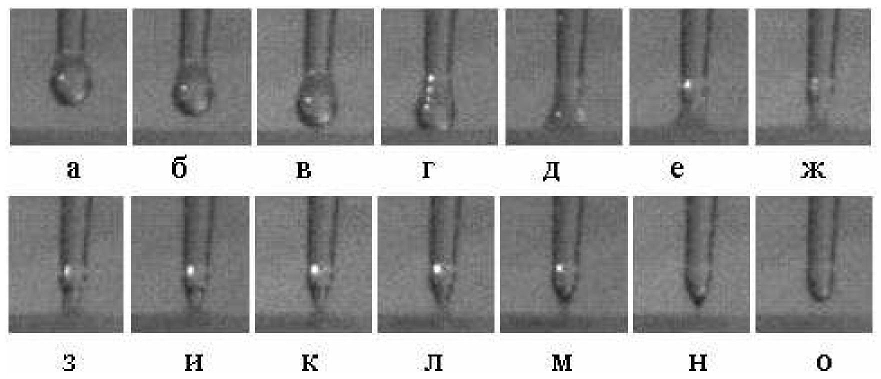


Рис. 2. *Видеокадры перехода капли глицерина при импульсном движении пипетки (400 кадр/с)*

Эти кадры дают возможность определить четыре этапа переноса капли в жидкую ванну:

1. Ускоренное движение капли в сторону жидкой ванны вместе с пипеткой (*а, б, в*).
2. Остановка пипетки и продолжение движения капли до касания капли с жилкой ванной (*в, г, д*).
3. Перетекание капли в ванну (*е, ж, з, и*).
4. Обрыв жидкой перемычки (*к, л, м, н, о*).

Все эти этапы соответствуют переносу капли электродного металла при сварке с импульсной подачей сварочной проволоки.

При сравнении процессов с неподвижной пипеткой и при ее импульсном движении видно, что время протекания второго из них на порядок ниже, поэтому проводится анализ именно этого процесса.

На первом этапе во время движения происходит накопление кинетической энергии капли $W_к$=0,5$m\upsilon^2$, где m – масса капли; υ – скорость движения пипетки. В начале разгона, скорость центра массы капли изменяется по закону, близкому к синусоидальному. Затем под действием упругих сил деформированной капли центр массы ускоряется до величины, равной ускорению пипетки.

Второй этап наступает после остановки пипетки. В это время капля движется ускоренно относительно пипетки под действием сил инерции. Накопленная во время движения пипетки кинетическая энергия переходит в энергию деформации капли, которая под действием сил инерции продолжает движение ее центра масс. Но при движении центра масс увеличивается длина капли и площадь ее поверхности, а работа по ее увеличению равна произведению силы инерции на перемещение центра масс $W_д$=$\Phi_e \cdot \Delta l$, где Δl=ℓ – увеличение длины капли под воздействием ее кинетической энергии, но $W_д$=$\sigma \cdot \Delta S$, где ΔS – увеличение площади поверхности. Тогда $\ell = \frac{\sigma \cdot \Delta S}{\Phi_e}$. Приравняв оба выражения, получим

$$\Delta S = \frac{m \cdot \upsilon^2}{2 \cdot \sigma}.$$

Другой способ определения увеличения площади поверхности состоит в разбивке ее на сегменты

$$\Delta S = 2 \cdot \pi \cdot (\int_0^{\ell_1} R_1 \cdot \ell_1 \cdot d\ell + \int_{l_1}^{\ell_2} R_2 \cdot \ell_2 \cdot d\ell +$$

$$+ \dots + \int_{l_{n-1}}^{\ell_n} R_n \cdot \ell_n \cdot d\ell) = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \int_0^{l_n} \sum_{n=1}^{n} R_n \cdot d\ell,$$

где L – общая длина капли. Как видно из представленных выше выражений увеличение длины и площади поверхности линейно связаны с приложенным усилием.

Капля, продолжая удлиняться, касается жидкой ванны, израсходовав на это часть накопленной энергии, которая зависит не только от ее величины, но и от расстояния между остановившейся пипеткой и жидкой ванной. Скорость капли также зависит от расстояния между ней и остановившейся пипеткой и оставшейся кинетической энергией, а, учитывая линейную зависимость между этой энергией, длиной капли и ее площадью, можно сказать, что скорость снижается по линейному закону

$$\upsilon_к = \frac{\Delta S}{\ell \cdot t}.$$

Тогда оставшаяся энергия, переходящая в жидкую ванну, будет равна

$$W_о = \frac{1}{2} \cdot m_к \cdot \upsilon_н - \Phi_e \cdot \Delta \ell,$$

где $\Delta\ell$ – расстояние между остановившейся пипеткой и жидкой ванной.

На третьем этапе оставшаяся энергия складывается с силой поверхностного натяжения, что увеличивает скорость всасывания капли в жидкую ванну. Следовательно, сила втягивания капли

$$F_в = \frac{W_о}{\ell - \Delta \ell} + \pi \cdot \sigma \cdot (R - r).$$

В результате, на четвертом этапе, ускоряется переход капли в ванну и происходит разрыв жидкой перемычки между пипеткой и ванной. Вязкость жидкости затягивает процесс разрыва. Перетекание капли также зависит от ее общей энергии, которая в свою очередь связана с силой поверхностного натяжения и капиллярной постоянной, только в отличие от процесса с неподвижно закрепленной пипеткой здесь участвует не потенциальная энергия, а оставшаяся кинетическая. С учетом выше сказанного

$$W_{кап} = \sigma \cdot \pi \cdot (R_к - r_п)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma}{g \cdot \rho_ж}} +$$

$$+ (\frac{1}{2} \cdot m_к \cdot \upsilon_н - \Phi_e \cdot \Delta \ell).$$

Все эти этапы перехода капли соответствуют этапам перехода капли электродного металла в сварочную ванну с импульсной подачей сварочной проволоки. При сварке с импульсной подачей капля жидкого металла находится на торце сварочной проволоки, которая во время импульса ускоренно перемещается в сторону сварочной ванны, а затем резко останавливается, передавая свою кинетическую энергию капле электродного металла.

В предложенной модели отрыва капли, как и в реальных условиях сварки, капля имеет непосредственную связь с твердым носителем – стеклянной пипеткой, а пипетка ускоренно движется в сторону жидкой ванны до ее остановки. Скорость движения капли изменяет ее кинетическую энергию, которая связана с массой. Следовательно, динамические силы, воздействующие на перенос металла, при импульсной подаче проволоки зависят от скорости ее движения.

При перенесении модели в реальные условия горения сварочной дуги необходимо учитывать, что в сварочной дуге отрыву капли в основном препятствуют плазменные потоки, состоящие из паров испаряющегося металла, сила которых связана со сварочным током. При ускоренном движении они смещают анодное пятно на переднюю часть

торца проволоки, в результате чего капля перемещается на ее боковую поверхность. В описываемых условиях плотность плазменных потоков, как и в предыдущем варианте, моделируется как плотность окружающего воздуха.

Выводы

1. Сравнение видеограмм моделируемых процессов показывает, что при импульсном движении пипетки благодаря накопленной кинетической энергии скорость перехода капли в жидкую ванну на порядок выше, чем при неподвижно закрепленной с равномерно увеличивающейся в объеме каплей.
2. Приводимая модель дает возможность определить преимущество сварки с импульсной подачей сварочной проволоки перед сваркой с непрерывной подачей.
3. Увеличение длины капли поглощает энергию капли, уменьшая ее кинетическую составляющую на момент касания каплей с жидкой ванной, следовательно, при импульсном движении капли скорость ее перехода зависит от расстояния между остановившейся каплей и жидкой ванной.
4. Скорость перехода капли в жидкую ванну и ее отрыв от жидкого носителя зависит от энергии (потенциальной и кинетической), накопленной каплей до касания ее с жидкой ванной, поэтому при импульсной подаче капли жидкости скорость ее перехода на порядок выше, чем при нарастании массы без движения.
5. При сварке с короткими замыканиями сварочной дуги силы поверхностного натяжения играют положительную роль в переходе капли в сварочную ванну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 519 с.
2. Гегузин Я.Е. Капля. – М.: Наука, 1973. – 160 с.
3. Патапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
4. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.

УДК 548.4.001:621.791.052.08:620.179.16